

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2015.01.019

桥梁清水混凝土设计方法与匀质性控制

周孝军¹, 牟廷敏², 丁庆军³, 聂传振³

(1. 西华大学 建筑与土木工程学院, 成都 610039; 2. 四川省交通运输厅公路规划勘察设计研究院, 成都 610041;
3. 武汉理工大学 硅酸盐建筑材料国家重点实验室, 武汉 430070)

摘要:根据桥梁工程结构特点,提出了桥梁清水混凝土的配合比优化设计方法,制备出粘聚性与包裹性好、流动度佳,且具有优良力学性能的 C30~C50 高性能清水混凝土。通过对混凝土拌合物含气量、硬化试件不同部位显微硬度与微观结构的测试,分析了增粘剂对其匀质性的影响规律。试验表明:对于 C30 桥梁清水混凝土,掺 5×10^{-5} 的纤维素醚或掺 6% 的硅灰时,混凝土的含气量不超过 2%,浆体旋转粘度值在 1 900~2 000 MPa·s 之间,试件不同部位显微硬度值接近,匀质性好,结构密实。

关键词:清水混凝土;增粘剂;匀质性;显微硬度

中图分类号:U444;TU528 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2015)01-0117-06

Design method and homogeneity control of bridge fair-faced concrete

Zhou Xiaojun¹, Mou Tingmin², Ding Qingjun³, Nie Chuazhen³

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, P. R. China;
2. Sichuan Provincial Transport Department Highway Planning Survey Design and Research Institute, Chengdu 610041, P. R. China;
3. State Key Laboratory of Silicate Materials for Architectures, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, P. R. China)

Abstract: According to the structural characteristics of bridge engineering, the mix optimization design method of bridge fair-faced concrete was presented, and C30~C50 concrete with high cohesion and package, outstanding fluidity and excellent mechanical properties were prepared. Through the test of air content of fresh concrete, micro hardness and micro structure in different parts of hardened concrete specimens, effects of viscosity-modifying admixtures on homogeneity of concrete were discussed. The results showed that the composition of bridge fair-faced concrete were relatively homogeneous, and the microstructure were relatively dense. When C30 concrete mixed with 5×10^{-5} cellulose ether or 6% silica fume (mass fraction of cementitious material), air content of fresh concrete were less than 2%, and slurry viscosity values were between 1 900 and 2 000 MPa·s. Also, the micro hardness values in different parts of hardened concrete specimens were closed. The results were applied in practical bridge engineering, which generally meets the apparent quality requirements of bridge fair faced concrete.

Key words: fair-faced concrete; viscosity-modifying admixture; homogeneity; micro hardness

收稿日期:2014-05-20

基金项目:四川省交通科研项目(2011D-05)

作者简介:周孝军(1985-),男,博士,主要从事高性能混凝土及其结构性能研究,(E-mail)zhouxiaojun111@163.com。

Received:2014-05-20

Foundation item: Sichuan Traffic Science and Technology Project(No. 2011D-05)

Author brief: Zhou Xiaojun (1985-), PhD, main research interest: high performance concrete, (E-mail) zhouxiaojun111@163.com.

清水混凝土分为普通、饰面和装饰清水混凝土 3 类,其具有质朴厚实、素面朝天的外观特性,并省掉了抹灰和装饰等工序,被行业内称为“绿色混凝土”^[1-4]。清水混凝土已有一定的研究和发展,但多集中在建筑工程领域,且非常注重其表面平整光滑、棱角分明的艺术效果^[2-8]。桥梁工程的服役环境、施工工艺等与建筑工程差异较大,一般采用普通清水混凝土,只要求表面平整光滑且无明显色差、气孔等,而对饰面装饰效果没有特殊要求,目前有关桥梁清水混凝土的设计制备与性能研究还较少,不利于其推广应用^[4-6]。桥梁结构构造复杂、配筋率高、预应力钢束密集,混凝土应具有很好的工作性能以满足密实施工要求;另外,桥梁不同结构部位的混凝土强度等级不同,但普通混凝土配合比设计方法缺乏针对性,设计的不同强度等级混凝土工作性能差异显著,匀质性较差,无法达到工程整体清水效果^[4]。

因此,需要根据桥梁工程结构特点,研究桥梁清水混凝土的设计方法与匀质性控制技术,改善混凝土工作性能,保证构件外观质量,提高结构安全与耐久性,为工程应用提供技术支撑。

1 原材料

PO.42.5 水泥,主要化学成分如表 1 所示。天然河砂,细度模数 2.5,含泥量 1.8%,泥块含量 0.3%。石灰岩质碎石,粒径 5~25 mm 连续级配,含泥量 0.4%,针片状含量 1.7%。V630 型清水混凝土专用聚羧酸减水剂。LH-70MR 非速溶型纤维素醚,分子量 20 万。矿物掺合料:I 级粉煤灰,细度 $\leq 12\%$ (0.045 mm 方孔筛筛余),需水量比 92.6%;硅灰,比表面积 $2 \times 10^4 \text{ m}^2/\text{kg}$, SiO_2 含量 90%。拌合用水为自来水。

表 1 水泥化学组成(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of the cement(mass fraction, %)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	f-CaO	SO ₃	Loss
20.75	5.91	63.21	4.20	2.43	0.06	1.2	1.15	1.07

2 配合比设计

2.1 设计思路

应用于建筑工程领域的清水混凝土,为了实现低含气量要求,坍落度控制较小,难以满足桥梁工程混凝土密实施工要求。另外,不同强度等级混凝土的胶凝材料用量不同,采用普通混凝土配合比设计方法制备的混凝土工作性能差异大,匀质性差,易出现色差、气孔等缺陷,既影响构件表观质量,又影响耐久性。

实现桥梁清水混凝土高工作性能、高耐久性的设计思路与技术途径主要有:采用基于分子链组成结构设计的专用聚羧酸系减水剂,提高混凝土工作性能,减少用水量,降低含气量。掺优质矿物掺合料,改善混凝土工作性能,优化孔结构,增加密度,

减小体积变形^[9-10]。对于低强度等级混凝土(C40 及以下),提高矿物掺合料掺量,适当提高砂率;对于高强度等级的混凝土(C50 及以上),优化减水剂掺量,适当降低水泥用量和砂率,结合增粘剂^[11-16],控制浆体粘度,减小集料相对移动,保持不同密度胶凝材料均匀分散,提高混凝土的匀质性。

2.2 配合比与物理力学性能

基于密实骨架堆积理论,根据提出的混凝土配合比设计思路,制备了 C30~C50 桥梁高性能清水混凝土,配合比与物理力学性能如表 2 所示。混凝土包裹性与流动性好,初始坍落度在 200 mm 以上、扩展度在 500 mm 以上,1 h 后坍落度仍大于 180 mm、扩展度大于 420 mm,损失较小,工作性能与力学性能满足设计要求。

表 2 混凝土配合比与物理力学性能

Table 2 Concrete mix proportion and the physical mechanical properties

标号	配合比/(kg·m ⁻³)						坍落度/mm		扩展度/mm		抗压强度/MPa	
	石子	砂	粉煤灰	水泥	水	外加剂	0 h	1 h	0 h	1 h	7 d	28 d
C30	1 038	785	100	280	152	4.18	200	185	510	425	35.5	41.2
C40	1 101	734	80	340	143	5.46	215	200	545	460	39.7	55.6
C50	1 135	695	80	400	144	7.68	230	215	580	505	51.2	67.2

3 匀质性测试分析与讨论

以 C30 混凝土为基准,分别采用纤维素醚与硅灰作为增粘剂,通过对混凝土含气量、浆体粘度,以及硬化试件 3 d 龄期时上、中、下不同部位显微硬度的测试,探讨增粘剂对混凝土匀质性的影响规律,以实现匀质性的控制。

3.1 测试方法

新拌混凝土含气量采用 LC615A 型含气量测定仪,按《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》(GB/T 50080—2002)进行测试。浆体粘度采用 DV-S 型旋转粘度计,按《粘度测试方法》(GB 10247—2008)进行测试。根据《金属维氏硬度试验方法》(GB/T 4340.1—2009),采用 HV-1000Z 显微硬度计测试混凝土试件 3 d 显微硬度值,如图 1、图 2 所示。由于粉煤灰活性较低,如其上浮形成富集,则该区域胶凝材料水化相对较慢,整体强度低,表面显微硬度均值较其它区域低。

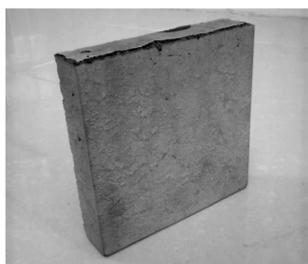


图 1 显微硬度测试样品

Fig. 1 Specimen of micro hardness test

3.2 纤维素醚对匀质性的影响

纤维素醚对混凝土性能的影响如表 3 所示。可

表 3 纤维素醚对混凝土匀质性的影响

Table 3 Influence of cellulose ether on concrete homogeneity

纤维素醚 掺量/(10^{-5})	含气量/ %	粘度值/ ($\text{MPa} \cdot \text{s}$)	坍落度/ mm	扩展度/ mm	显微硬度平均值 HV		
					上部	下部	上下部差值
0	1.4	1 320	190	550	95.48	171.81	76.33
2	1.6	1 520	200	550	96.44	149.66	53.22
3	1.7	1 840	200	525	125.29	158.02	32.73
4	1.8	1 920	195	580	161.39	183.6	22.20
5	1.8	1 960	195	550	189.68	201.82	12.14
6	2.5	3 000	445	185			

纤维素醚对水泥基材料的增粘效果来自于纤维素醚溶液的粘性^[12-13]。纤维素醚分子可以吸附和固化一部分拌合水后膨胀,使拌合水粘度增加。同时,其分子链之间相互缠绕,形成三维网络结构,也能增

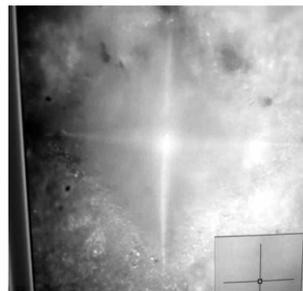
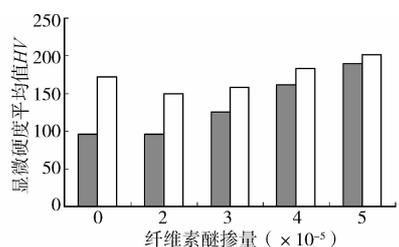


图 2 显微硬度测定

Fig. 2 Micro hardness measurement

见,随纤维素醚掺量增加,浆体旋转粘度值与混凝土含气量随之上升,流动性下降,硬化试件表面上、下部显微硬度值之差逐渐减小(如图 3)。当其掺量达到 5×10^{-5} (占胶凝材料总量)时,混凝土含气量为 2.0%,粘度值为 $1\ 960 \text{ MPa} \cdot \text{s}$,坍落度大于 180 mm、扩展度大于 500 mm,工作性能较好;试件表面上、下部显微硬度值之差为 12.14 HV,显微硬度相当,匀质性较好。而当掺量达到 6×10^{-5} 时,含气量与浆体粘度显著增加,混凝土工作性能劣化明显,已不能满足桥梁施工要求。



注: ■上部显微硬度均值 □下部显微硬度均值

图 3 纤维素醚对试件显微硬度的影响

Fig. 3 Influence of cellulose ether on micro hardness of the specimens

加溶液粘度。从而使得粉煤灰等移动阻力增加,增强了混凝土拌合物的抗分散能力,防止各组分之间分层、离析和泌水,提高混凝土匀质性。但其掺量越高,粘度越大,排气不畅而导致混凝土含气量增加,

且流动性下降,工作性能退化。当粘度过高后,混凝土流动度损失明显,需增加用水量以满足工作性能要求,从而降低混凝土密实度,并对强度造成一定的影响^[14],因此,需严格控制其掺量。

3.3 硅灰对匀质性的影响

表 4 为硅灰对混凝土匀质性影响测试结果。研究表明,随硅灰掺量提高,浆体旋转粘度值随之上升,混凝土的含气量则下降,坍落度与扩展度下降明显,硬化混凝土试件表面上、下显微硬度值差也随之降低(如图 4 所示)。当硅灰掺量为 6% 时,混凝土的含气量为 1.5%,浆体旋转粘度值为 1 920 MPa·s,粘度适中,混凝土工作性能良好,试块表面上、下部显微硬度值相当接近,匀质性好。而当掺量达到 8% 时,虽然试块表面上、下部显微硬度值基本一致,但混凝土已十分粘稠,流动性与施工性能很差。

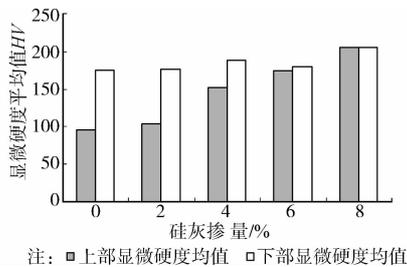


图 4 硅灰对试件显微硬度的影响

Fig. 4 Influence of silica fume on micro hardness of the specimens

硅灰增强混凝土浆体粘度的关键在于其颗粒形态效应与分散作用^[10]。硅灰的比表面积大,颗粒呈球形状,平均粒径细小,约比水泥颗粒粒径小两个数量级,比粉煤灰颗粒粒径小一个数量级,其具有高度的分散性和较大的表面能。因此,硅灰可以充分的填充在水泥与粉煤灰颗粒之间,减少填充水量,降低孔隙率,同时也能堵塞浆体泌水通道,阻碍粉煤灰的移动,从而提高浆体硬化后的密实度与均匀性。硅灰的火山灰活性较强,可迅速与浆体中的水反应,形成较多的絮凝结构,使浆体粘度,降低流动性,增加集料相对移动的阻力,保持混凝土各组分分布的均匀性。另外,由于硅灰颗粒比表面积大,虽然其掺量减少了填充水量,但同时也需要增加表层水的用量,因此在掺量过多的情况下,致使浆体密度变大,粘度过高,导致混凝土流动性下降明显,工作性能劣化明显。

3.4 微观结构分析

分别对掺 5×10^{-5} 纤维素醚和掺 6% 硅灰量的混凝土试件进行破碎,取其上、中、下 3 个不同部位的砂浆样品进行了 SEM 观测,结果如图 5、图 6 所示。可以看出,在两类试件中集料与水化产物界面过渡区较饱满,结构密实,基本没有微裂缝;上、中、下 3 个不同部位的粉煤灰分布较均匀,未出现粉煤灰上浮富集现象。可见,通过掺加适量增粘剂,控制浆体粘度,可保持混凝土良好的工作性能,且能有效避免粉煤灰上浮,提高混凝土的匀质性。

表 4 硅灰对混凝土匀质性的影响

Table 4 Influence of silica fume on concrete homogeneity

硅灰掺量/%	含气量/%	粘度值/ (MPa·s)	扩展度/ mm	坍落度/ mm	显微硬度平均值 HV		
					上部	下部	上下部差值
0	1.4	1 320	550	190	95.36	172.07	76.71
2	2.2	1 120	600	200	106.26	171.01	64.84
4	2.1	1 520	510	200	154.59	185.86	31.27
6	1.5	1 920	510	170	176.20	181.85	5.65
8	1.8		300	150	208.08	208.6	0.52

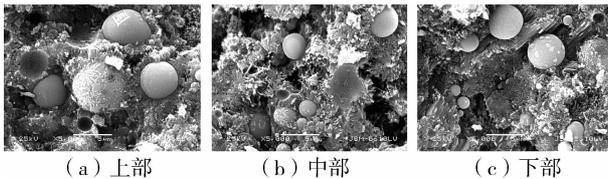


图 5 掺纤维素醚试件 SEM 图($\times 5\ 000$)

Fig. 5 SEM test results of specimens mixed with cellulose ether(5 000 times)

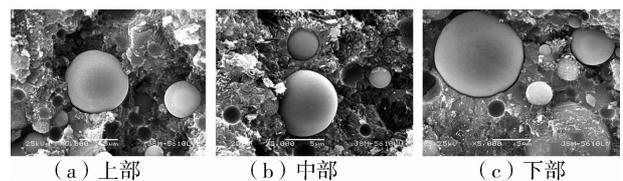


图 6 掺硅灰试件 SEM 图($\times 5\ 000$)

Fig. 6 SEM test results of specimens mixed with silica fume(5 000 times)

4 工程应用

四川省遂广高速公路桥梁工程的主梁、墩柱均采用清水混凝土设计方案,施工初期,混凝土设计制备时未进行匀质性控制,墩柱(C30)在混凝土分层浇筑处出现了明显的色差和分层,取混凝土拌合物静置后发现表面有明显深色漂浮物,如图 7、图 8 所示。分析认为,混凝土中粉煤灰掺量高且为颜色偏深的二级灰,坍落度较大(>220 mm),粘聚性差,匀质性不良,导致振捣后粉煤灰上浮。

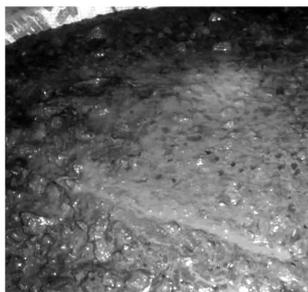


图 7 不掺增粘剂混凝土

Fig. 7 Concrete mixture without viscosity-modifying admixture



图 8 不掺增粘剂墩柱

Fig. 8 Pier column pouring by concrete without viscosity-modifying admixture

根据项目研究成果,采用密实骨架堆积法对集料组成进行设计,适当调整砂率,采用专用外加剂,掺加 $2 \times 10^{-5} \sim 3 \times 10^{-5}$ 纤维素醚(对已进场的外加剂,复掺 5×10^{-5} 纤维素醚),提高混凝土拌合物粘度,增强粘聚性与粘结力。并适当延长混凝土拌合物的搅拌时间,实时测试混凝土拌合物的工作性能,根据实际情况对外加剂掺量、用水量以及增粘组分掺量进行调整,保持混凝土浇筑时坍落度在 $160 \sim 180$ mm,且混凝土施工过程中加强振捣与养护。调整后的混凝土匀质性较好,静置后或浇筑振捣过程中均未出现粉煤灰上浮,墩柱、主梁表面光亮、色泽均一,外观效果得到有效改善,如图 9、图 10 所示。

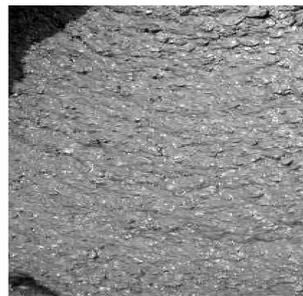


图 9 掺增粘剂混凝土

Fig. 9 Concrete mixture mixed with viscosity-modifying admixture



图 10 掺增粘剂墩柱

Fig. 10 Pier column pouring by concrete mixed with viscosity-modifying admixture

5 结论

1)根据桥梁结构特点,提出了桥梁清水混凝土的配合比设计思路与高性能化技术途径,制备出均质性好且工作性能与力学性能优良的 C30~C50 高性能清水混凝土,并应用于实际桥梁工程。

2)通过对混凝土拌合物含气量、硬化试件不同部位的显微硬度与微观结构的测试研究表明:对于 C30 桥梁清水混凝土,当掺 5×10^{-5} 纤维素醚或掺 6% 硅灰时,混凝土含气量不超过 2%,密实性好;浆体旋转粘度值在 $1\ 900 \sim 2\ 000$ MPa·s 之间,粘度适中,工作性能较好;试件表面不同部位显微硬度值接近,混凝土匀质性好。以纤维素醚或硅灰为增粘剂,可以有效调整浆体粘度,改善混凝土的匀质性,提高密实度。

参考文献:

[1] 李强,李辛民,孟闻远,等.我国清水混凝土技术发展现状、存在问题及对策[J].建筑技术,2007,38(1):6-8.

Li Q, Li X M, Meng W Y, et al. Development status of finish concrete technology in our country and its existing problems

- and countermeasures [J]. *Architecture Technology*, 2007, 38 (1):6-8. (in Chinese)
- [2] 陈晓芳. 高性能饰面清水混凝土及其施工技术研究 [D]. 广州:华南理工大学, 2011.
- [3] Hurd M K. Avoiding arguments over architectural concrete [J]. *Concrete Construction*, 1990(9):28-30.
- [4] 黄路. 城市高架桥混凝土外观质量控制 [D]. 重庆:重庆交通大学, 2008.
- [5] 姚刚, 高天, 张利. 清水混凝土施工的质量缺陷与预控措施 [J]. *重庆建筑大学学报*, 2004, 26(6):68-71.
Yao G, Gao T, Zhang L. Defect and pre-control methods for fair-faced concrete construction [J]. *Journal of Chongqing Jianzhu University*, 2004, 26(6):68-71.
- [6] 何锦华, 王守合, 杜建峰, 等. 超大面积清水混凝土结构清水混凝土配制及施工技术 [J]. *混凝土*, 2006(6):77-79.
He J H, Wang S H, Du J F, et al. Preparation and construction technology of super iarge area fair-faced concrete structure [J]. *Concrete*, 2006 (6): 77-79. (in Chinese)
- [7] Pourchez J, Peschard A, Grosseau P, et al. HPMC and HEMC influence on cement hydration [J]. *Cement and Concrete Research*, 2006, 36(2):288-294.
- [8] 师海霞, 龙俊余. 聚羧酸减水剂在高速铁路构件混凝土中的应用 [J]. *混凝土世界*, 2010(5):50-51.
Shi H X, Long J Y. Application of polycarboxylate superplasticizer in concrete construction members in high speed railways [J]. *China Concrete*, 2010(5):50-51. (in Chinese)
- [9] 张力冉, 郝兵, 刘治华, 等. 粉煤灰/硅灰对新拌复合浆体多级絮凝结构的影响 [J]. *商品混凝土*, 2011(9):35-38.
Zhang L R, Hao B, Liu Z H, et al. Effect of FA/SF on multi-level flocculation structure model of fresh mixing paste [J]. *Ready-mixed Concrete*, 2011(9):35-38. (in Chinese)
- [10] 魏铮, 蔡良才, 付亚伟. 硅灰自密实高性能道面混凝土性能研究 [J]. *建筑技术*, 2011, 42(2):144-146.
Wei Z, Cai L C, Fu Y W. properties of silica fume self-compaction high performance pavement concrete [J]. *Architecture Technology*, 2011, 42 (2): 144-146. (in Chinese)
- [11] Khayat K H. Effect of anti-washout admixtures on fresh concrete properties [J]. *ACI Materials Journal*, 1995, 92 (2):164-171.
- [12] 欧志华, 马保国, 蹇守卫. 非离子纤维素醚在新拌水泥基材料中的作用及研究进展 [J]. *硅酸盐通报*, 2012, 31 (1):96-98.
Ou Z H, Ma B G, Jian S W. Effect of non-ionic cellulose ethers on fresh cement-based materials and its research progress [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2012, 31(1):96-98. (in Chinese)
- [13] 苏雷, 马保国, 蹇守卫, 等. 纤维素醚-膨胀珍珠岩耦合作用下水泥浆体早期水化规律 [J]. *功能材料*, 2012, 43 (15):2012-2015.
Su L, Ma B G, Jian S W, et al. Early stage hydration law of cement pastes under the coupling effect of cellulose ether and expanded perlite [J]. *Journal of Functional Materials*, 2012, 43(15):2012-2015. (in Chinese)
- [14] Rols S, Ambroise J, Pera J. Effects of different viscosity agents on the properties of self-leveling concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 1999, 29(2):261-266.
- [15] Lachemi M, Hossain K M, Lambros V, et al. Performance of new viscosity modifying admixtures in enhancing the rheological properties of cement paste [J]. *Cement and Concrete Research*, 2004, 34 (2):185-193.
- [16] Saric-Coric M, Khayat K H, Tagnit-Hamou A. Performance characteristics of cement grouts made with various combinations of high-range water reducer and cellulose-based viscosity modifier [J]. *Cement and Concrete Research*, 2003, 33(12):135-14.

(编辑 王秀玲)